中国生态农业学报 2016 年 11 月 第 24 卷 第 11 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Nov. 2016, 24(11): 1456−1463

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160405

秸秆还田与施氮对黑土区春玉米田产量、温室气体排放及土壤酶活性的影响*

吕艳杰[1,2] 于海燕[1] 姚凡云[2] 曹玉军[2] 魏雯雯[2] 王立春[2] 王永军[2**]

(1. 吉林农业科技学院 吉林 132011; 2. 吉林省农业科学院农业资源与环境研究所/玉米国家工程实验室 长春 130033)

摘 要 探讨秸秆还田与施氮对高纬度黑土区春玉米产量与温室气体排放特性的影响，对促进粮食增产和降低环境代价具有重要意义。本研究通过位于黑土区的大田定位试验，利用静态箱–气相色谱计数方法，在秸秆还田与不还田和 3 个氮素用量(纯 N: 120 kg·hm^{-2}, 240 kg·hm^{-2} 和 300 kg·hm^{-2})条件下，研究了春玉米不同生育时期农田土壤 CO_2、N_2O 和 CH_4 综合温室效应与排放强度，以及土壤过氧化氢酶和脲酶活性的变化。结果表明：无秸秆还田时，高氮用量处理春玉米产量最高；秸秆还田后，中等氮用量处理(240 kg·hm^{-2})春玉米产量最高，且与无秸秆还田的高氮处理间无显著差异。无秸秆还田时，随施氮量增加，CO_2、N_2O 和 CH_4 排放量均显著提高，综合温室效应和土壤温室气体排放量与强度显著增加($P<0.05$)；增施氮肥配合秸秆还田，增加了 CO_2 和 N_2O 的排放量，而土壤 CH_4 的碳汇功能增强，温室气体排放量与强度未显著提高($P>0.05$)。无秸秆还田，增施氮肥降低了土壤过氧化氢酶活性但提高了土壤脲酶活性；而秸秆还田使得增施氮肥引起的土壤过氧化氢酶活性降低的幅度加大但土壤脲酶活性提高的幅度变小。因此，秸秆还田后配合中等用量氮处理(240 kg·hm^{-2})玉米产量最高，且能够抑制单纯增施氮肥对综合温室效应和土壤温室气体排放强度的促进作用，推荐在生产中参考使用。

关键词 黑土 秸秆还田 氮肥 温室气体 土壤酶活性 春玉米
中图分类号: S154; S341 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)11-1456-08

Effects of soil straw return and nitrogen on spring maize yield, greenhouse gas emission and soil enzyme activity in black soils*

LYU Yanjie[1,2], YU Haiyan[1], YAO Fanyun[2], CAO Yujun[2], WEI Wenwen[2], WANG Lichun[2], WANG Yongjun[2**]

(1. Jilin Agricultural Science and Technology College, Jilin 132011, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences / State Engineering Laboratory of Maize, Changchun 130033, China)

Abstract Northeast China spring maize production area is among the main maize cultivation regions in China. Due to located in high latitude region and singling cropping system, spring maize fields in black soil region of Northeast China is less reported as for researches on farmland greenhouse effects. It is therefore important to explore the effects of straw return to soil and nitrogen application on maize grain yield and greenhouse gas emissions in the area. In this study, a two-factor straw return (no straw return and straw return) and three-factor nitrogen (N) application (N: 120 kg·hm^{-2}, 240 kg·hm^{-2} and 300 kg·hm^{-2}) field experiment was conducted in a randomized block design. Total emissions of CO_2, N_2O and CH_4, global warming potential of CO_2^{-eq} and greenhouse gas emissions intensity (GHGI), soil catalase and urease activities were determined in the experiment.

* 吉林省自然科学基金项目(20130101090JC)、国家科技支撑计划项目(2013BAD07B02)和吉林省科技发展计划(20150519010JH, 2015GJLS005NY)资助
** 通讯作者: 王永军，主要研究方向为作物生理生态。E-mail: yjwang2004@126.com
吕艳杰，主要从事玉米生理生态研究。E-mail: agriculturebasis@163.com
收稿日期: 2016−05−02 接受日期: 2016−07−15

* Funded by the Natural Science Foundation of Jilin Province (20130101090JC), the National Key Technology R&D Program of China (2013BAD07B02), and the Science and Technology Development Plan of Jilin Province (20150519010JH, 2015GJLS005NY)
** Corresponding author, E-mail: yjwang2004@126.com
Received May 2, 2016; accepted Jul. 15, 2016

The results showed that the highest yield was observed in straw return with medium N dose (240 kg·hm^{-2}) treatment, which was not significantly different from that of the highest N dose (300 kg·hm^{-2}) with no straw return treatment ($P > 0.05$). With increasing N dose, CO_2, N_2O and CH_4 emissions, global warming potential of CO_2^{-eq}, and GHGI significantly increased under no straw return conditions. On the other hand, N application with straw return only enhanced CO_2 and N_2O emissions, while soil CH_4 carbon sink increased ($P < 0.05$), and greenhouse gas emissions and intensities (CO_2^{-eq} and GHGI) did not increase remarkably ($P > 0.05$). Under no straw return conditions, N application reduced soil catalase activity and enhanced soil urease activity with increasing N application. However, straw return improved the decreasing range of soil catalase activity, and weakened the increasing range in soil urease activity caused by increased N application. Therefore, straw return with N application enhanced grain yield, with the highest yield under medium N application treatment (N: 240 kg·hm^{-2}). Medium N application with straw return limited greenhouse effects compared with no straw return in the experiment. The results were valuable for the recommendation of N application rates in spring maize cultivation in black soil regions.

Keywords　Black soil; Straw return; Nitrogen application; Greenhouse gas; Soil enzyme activity; Spring maize

东北平原中部黑土区素有“高产土壤”之美誉，兼具生产与生态安全功能，但该区域纬度高，受人类生产活动干扰相对更为剧烈，其作物产量与温室气体排放日益受到关注。在长期农业生产中，由于耕作、施肥不当和土壤侵蚀等原因，导致农田土壤有机质“量减质退”，土壤生产力受到严重影响[1−2]。前人研究表明大气 CO_2、N_2O 和 CH_4 等温室气体排放增加是全球气候变暖的重要原因，且农田土壤是这 3 种温室气体的重要来源之一[3−4]。近年来，由于气候变暖以及不合理农艺措施等又反作用于农田土壤，致使其肥力下降和温室气体排放量增加显著[5−8]。因此在高纬度地区农业生产中，迫切需要采取适宜的田间管理措施，在稳步提高土地生产力的同时有效控制温室气体排放。

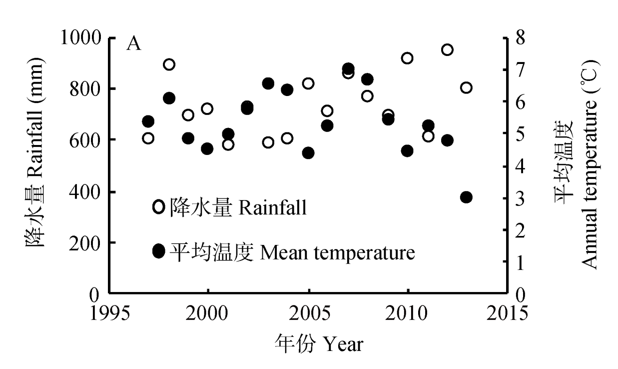
众所周知，秸秆还田不仅能减轻秸秆焚烧导致的环境污染，更是增加土壤有机质含量和更新速率，提升土壤地力的重要措施之一[8−10]。然而，东北黑土区农田玉米收获后水热不足，秸秆腐解速度慢，翌年春耕整地易导致机械缠绕、堵塞，播种质量受到严重制约，因此，传统秸秆覆盖和立茬还田在实际生产与应用中效果并不理想[11]。随着东北地区春玉米机械化收获水平的不断提高，秸秆粉碎还田将成为生产的发展方向。秸秆还田后，土壤中碳氮比提高，直接影响土壤酶和微生物的活动，进而影响到作物根系呼吸以及硝化−反硝化等温室气体排放关键过程[8,12−13]。氮素管理作为农业生产中最活跃的要素之一，在东北玉米生产中已经开展了大量的研究[14−16]；但在该地区，秸秆粉碎还田后，增加氮素来平衡作物生长和微生物分解秸秆需氮进而影响温室气体排放的相关研究较少[7,10]，对于作物生长季的温室气体排放强度和综合温室效应特征尚不明晰。土壤酶主要包括土壤脲酶、转化酶、过氧化氢酶等，与土壤碳氮转化密切相关，其活性是敏感的土壤生物学指标，其活性大小既可反映土壤肥力[17−18]，又与作物根系生长发育及土壤温室气体排放密切相关[8,12,19]。秸秆还田和施肥等农艺措施会对温室气体排放和土壤脲酶、过氧化氢酶活性产生影响[20−22]，因为秸秆还田和施肥可提供作物生长所必需的氮、磷、钾等营养元素，也可以改变土壤中的碳氮比，影响微生物的活动，从而影响温室气体的排放[8,12,23]。

农业生产的最主要目标是不断提高经济产量，并促进可持续发展，农田生态系统生产要兼顾经济和环境协同发展，这对于地处高纬度的东北农区尤为重要。前人在一年两熟或多熟区，施肥方式和耕作制度等对农田温室效应的影响方面已有大量报道[6,8,16,24−28]，但对一熟制东北农田系统的相关研究相对薄弱。因此，本研究以东北黑土区春玉米田为研究对象，探讨：1)秸秆粉碎还田与氮用量对春玉米产量、土壤 CO_2、N_2O 和 CH_4 排放以及土壤过氧化氢酶和脲酶活性的影响；2)秸秆粉碎还田与增施氮肥条件下，土壤温室气体排放通量与土壤酶活性之间的关系。研究结果可为东北黑土区春玉米持续稳定增产和温室气体减排提供理论依据与技术借鉴。

1　材料与方法

1.1　试验样地概况

定位试验于 2010 年开始，在吉林农业科学技学院实验农场进行(E: 126°28′2.6″, N: 43°56′16.5″)，该区域属于中温带湿润气候，年均温 3.9 ℃，常年平均降水量 650~750 mm，无霜期 189~200 d，日照时数为 2 300~2 500 h；其中常年(1997—2013 年)及 2013 年的温度与降水情况如图 1 所示。试验地土壤类型为黑土，pH 6.57，有机质 19.6 g·kg^{-1}，全氮 1.21 g·kg^{-1}，全磷 1.2 g·kg^{-1}，全钾 30.64 g·kg^{-1}，速效氮 86.58 mg·kg^{-1}，有效磷 63.73 mg·kg^{-1}，速效钾 70 mg·kg^{-1}。



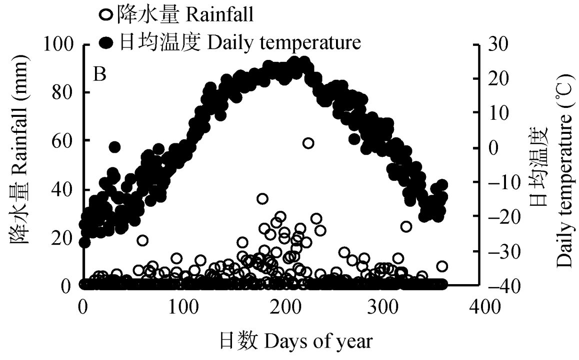


图 1 1997—2013 年的降水量、年均温度(A)及 2013 年的降水量、日均温(B)

Fig. 1 Annual precipitation and annual average temperature from 1997 to 2013 (A), the daily precipitation and daily average temperature of 2013 (B)

1.2 试验材料与设计

试验采用双因素随机区组设计，两因素分别为秸秆还田和施氮量。秸秆还田处理(S1)为春季秸秆粉碎后撒施土壤表面，翻耕整地，秸秆还田量为 6 000 kg·hm^{-2}，以秸秆不还田为对照(S0)；氮肥为尿素(含氮量 46.6%)，设 3 个施氮量处理，折合纯氮施氮量分别为 120 kg·hm^{-2}(低氮处理，N1)、240 kg·hm^{-2}(中氮处理，N2)和 300 kg·hm^{-2}(高氮处理，N3)。共设 6 个处理，重复 3 次，每个小区面积 32.5 m^2(3.25 m×10 m)。参照目前的生产习惯，于播前将 P_2O_5 100 kg·hm^{-2}、K_2O 100 kg·hm^{-2} 同氮肥一起，采取均匀撒施的方式作基肥一次性施入每个小区。种植玉米品种为‘先玉 335’，行距 65 cm，株距 28 cm，密度 55 000 株·hm^{-2}，5 月 4 日播种，9 月 28 日收获，其他管理同常规生产大田。

1.3 样品采集与处理

1.3.1 温室气体排放通量的测定

气体样品的采集分别于玉米播种后 44 d(拔节期，V6)、76 d(抽雄期，VT)、116 d(乳熟期，R3)和 142 d(成熟期，R6)进行，采样时间为上午 9:00—11:00。温室气体采集采用静态箱–气相色谱法，采样箱由有机玻璃制成，无底，上端有一直径 1.5 cm 的圆孔通道，塞上软橡皮塞，橡皮塞上插一枚 60 mL 注射器，在采样箱罩上后每间隔 10 min 采集 1 次，共采集 4 次，气体收集于 0.5 L 带有聚乙烯涂层的铝箔采样袋(大连，德霖)中，样品采集后 36 h 内，用气相色谱(Agilent 7820A, USA)分析 CO_2、CH_4 和 N_2O 气体浓度变化。30 min 内采集的 4 个气体样品浓度与采样时间间隔存在线性相关关系，所有样品的相关系数均在 r>0.95 时视为有效。气体排放通量计算公式：

$$F=\rho\times V/A\times\Delta c/\Delta t\times 273/(273+T) \tag{1}$$

式中：F 为气体排放通量，CO_2 单位为 mg·m^{-2}·h^{-1}，N_2O 和 CH_4 单位为μg·m^{-2}·h^{-1}；ρ为标准状态下气体的浓度；V 为采样箱体积(m^3)；A 为采样箱底面积(m^2)；Δc 为气体浓度差，N_2O 单位为 10^{-9} L·L^{-1}，CO_2 和 CH_4 单位为 10^{-6} L·L^{-1}；Δt 为采样时间间隔(h)；273 为绝对温度；T 为采样温度(℃)。

在气体排放通量基础上，采用滑动平均法计算玉米生长季内的温室气体排放量。

农田 CO_2、N_2O 和 CH_4 产生的综合温室效应用 CO_2 当量($CO_2$$^{-eq}$)表征，以便于从温室气体排放规模的角度对不同秸秆还田和施氮处理进行评价，其计算公式为：

$$CO_2^{-eq}(\text{kg·hm}^{-2})=CO_2\text{排放量}(\text{kg·hm}^{-2})+N_2O\text{排放量}(\text{kg·hm}^{-2})\times 298+CH_4\text{排放量}(\text{kg·hm}^{-2})\times 25 \tag{2}$$

式中：298 和 25 分别为 100 年尺度上 N_2O 和 CH_4 的相对 GWP(global warming potential)是 CO_2 的 298 倍和 25 倍[29]。

根据温室气体排放强度(GHG，单位产量的 CO_2 当量)相对大小，进一步从温室气体排放强度评判各处理的综合温室效应(GHGI)：

$$\text{GHGI}(\text{kg·kg}^{-1})= CO_2^{-eq}(\text{kg·hm}^{-2})/\text{作物产量}(\text{kg·hm}^{-2}) \tag{3}$$

1.3.2 土壤酶活性的测定

温室气体取样当天进行土壤田间取样，每小区采用“S”形取样法随机取 5 点，用土钻取 0~20 cm 层土样，土样经风干后过 20 目土筛，进行土壤脲酶和过氧化氢酶活性测定。脲酶活性测定采用苯酚–次氯酸钠比色法，过氧化氢酶活性的测定采用高锰酸钾滴定法[30]。

1.4 数据分析与处理

本研究采用秸秆粉碎覆盖还田长期定位试验第 4 年(2013 年)的玉米产量和田间数据。

同一生育期各处理间温室气体排放通量和酶活性的差异，采用 SPSS 18.0 软件进行分析，One-way ANOVA 进行方差分析，均值比较采用最小显著性差异法(LSD)，显著水平为 0.05。土壤温室气体排放通量与酶活性的相关性分析及作图采用 Microsoft Excel 2013 进行。

2　结果与分析

2.1　秸秆还田与施氮对玉米产量的影响

图 2 显示, 秸秆还田后, 中等用量氮处理(S1N2)获得最高籽粒产量, 与无秸秆还田最高氮用量处理(S0N3)差异不显著(P>0.05); 百粒重与籽粒产量的结果类似。秸秆还田后, 施氮不足(S1N1)或过量处理(S1N3)的籽粒产量均显著降低, 以中等用量氮处理(S1N2, 氮素用量 240 kg·hm^{-2})较高; 而 S1N2 和 S1N3 处理的百粒重差异不显著(P>0.05)。而无秸秆还田时, 随施氮量增加, 各处理籽粒产量和百粒重呈增加趋势。

2.2　秸秆还田与施氮对土壤温室气体排放的影响

由表 1 可看出, 无秸秆还田时, 施氮增加了 CO_2 和 N_2O 排放量和 CH_4 吸收量; 且随施氮量增加 CO_2 和 N_2O 排放量显著提高, S0N3 处理最高; CH_4 吸收量 S0N2 和 S0N3 间无显著差异。秸秆还田显著增加了土壤 CO_2 排放量, 且不同施氮量处理间无显著差异(P>0.05); 秸秆还田和增施氮肥, CH_4 固持量增加, 碳汇功能增强, S1N2 最大。秸秆还田和增施氮肥均显著提高了玉米生长季的综合温室效应(CO_2^{-eq})和温室气体排放强度(GHGI)。无秸秆还田时, 施氮量增加, CO_2^{-eq} 和 GHGI 显著增加, 以 S0N3 处理最高; 增施氮肥配合秸秆还田, 各处理 CO_2^{-eq} 和 GHGI 未显著提高, 而中等用量氮处理(S1N2)显著降低了 GHGI。秸秆还田后氮素用量过高或过低, 均显著增加了玉米生产的环境代价, 以中等用量氮处理(240 kg·hm^{-2})为宜。

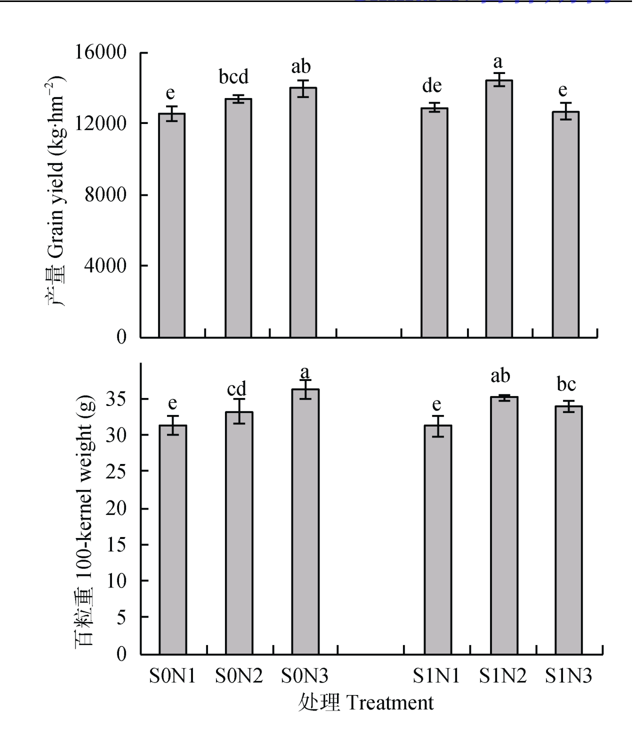


图 2　不同秸秆还田处理下施氮量对玉米籽粒产量及百粒重的影响

Fig. 2　Effect of nitrogen application rate on maize yield and 100-kernel weight under non straw returning and straw returning treatments

S0 和 S1 分别表示秸秆不还田和秸秆还田处理, N1、N2 和 N3 表示施氮量为 120 kg·hm^{-2}、240 kg·hm^{-2} 和 300 kg·hm^{-2}; 不同字母表示差异达 5%显著水平。下同。S0 and S1 mean treatments of no straw returning and straw returning, respectively. N1, N2 and N3 mean nitrogen application rates of 120 kg·hm^{-2}, 240 kg·hm^{-2} and 300 kg·hm^{-2}, respectively. Values with different letters are significantly different at P < 0.05. The same below.

表 1　不同秸秆还田和施氮处理下玉米田温室气体(CO_2、N_2O 和 CH_4)排放总量与全球增温潜势

Table 1　CO_2, N_2O and CH_4 total emissions and global warming potential under different straw returning and nitrogen application treatments

处理 Treatment	CO_2 排放量 CO_2 emission (kg·hm^{-2})	N_2O 排放量 N_2O emission (kg·hm^{-2})	CH_4 排放量 CH_4 emission (kg·hm^{-2})	综合温室效应 Comprehensive greenhouse effect [kg(CO_2^{-eq})·hm^{-2}]	温室气体排放强度(GHGI) Greenhouse gas intensity (kg·kg^{-1})
S0N1	7 895±61d	2.19±0.43e	−0.008±0.000 4c	8 547±97d	0.68±0.04c
S0N2	9 876±103c	5.49±0.72c	−0.011±0.000 4b	11 496±132bc	0.86±0.07b
S0N3	10 931±76b	6.37±0.42ab	−0.013±0.000 7b	12 828±105a	0.92±0.05ab
S1N1	11 495±43a	4.03±0.41d	−0.012±0.000 4b	12 697±139a	0.98±0.07a
S1N2	11 051±80a	5.28±0.38d	−0.017±0.000 7a	12 624±107a	0.87±0.06b
S1N3	10 070±87ab	6.18±0.53a	−0.010±0.000 6bc	11 911±161ab	0.94±0.08a

同列数值后不同字母表示处理间差异达 5%显著水平。Values in the same column with different letters are significantly different at 0.05 level.

2.3　秸秆还田与施氮对土壤酶活性的影响

随玉米生育进程, 土壤过氧化氢酶活性逐渐增强而脲酶活性逐渐降低(图 3)。成熟期(播后 142 d), 各处理过氧化氢酶活性为拔节期的 1.3~5.0 倍; 而拔节期(播后 44 d), 各处理脲酶活性为成熟期的 1.2~2.9 倍。

秸秆还田使得土壤过氧化氢酶活性增强幅度加大, 但土壤脲酶活性降低幅度变小。拔节期至成熟期, 秸秆还田处各理土壤过氧化氢酶活性增加 3.1~4.6 倍, 而无秸秆还田各处理仅增加 1.3~2.6 倍(图 3A, B); 秸秆还田处各理土壤脲酶活性降低 0.5~0.7 倍, 而无秸秆还田各处理却降低 0.3~0.7 倍(图 3C, D)。增施氮肥降低了土壤过氧化氢酶活性但提高了土壤脲酶活性。无秸秆还田, 土壤过氧化氢酶活性均以高氮水平处理(N3, 300 kg·hm^{-2})的较低(图 3A, C); 秸秆还田时, 均以中氮水平处理(N2, 240 kg·hm^{-2})的较高(图 3B, D)。

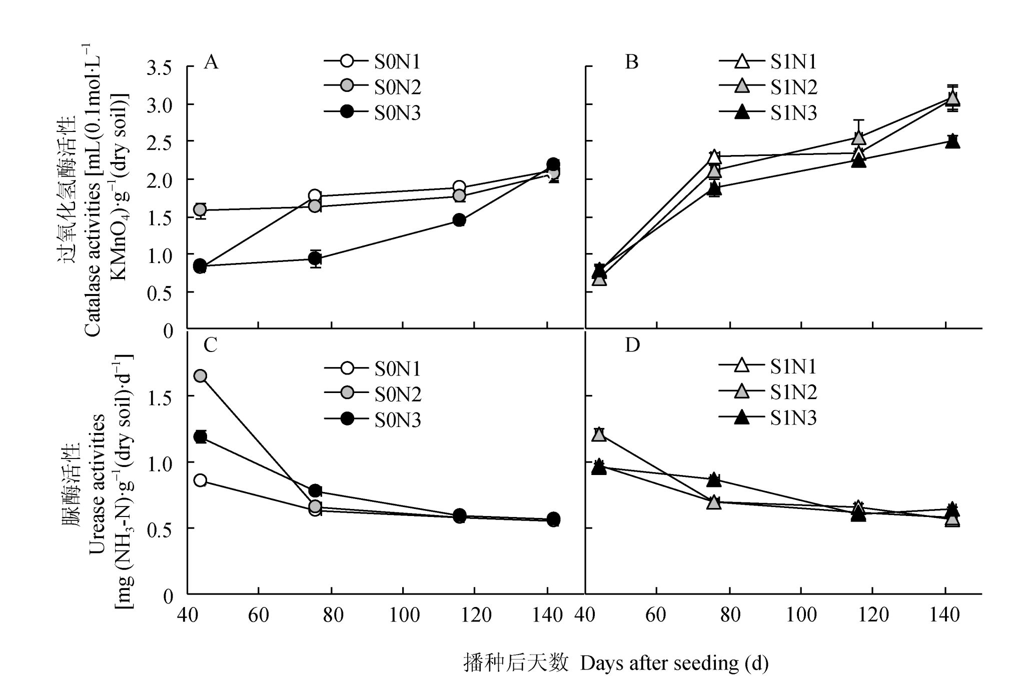


图 3 不同秸秆还田和施氮处理下玉米播种后土壤过氧化氢酶(A, B)和脲酶(C, D)活性的变化

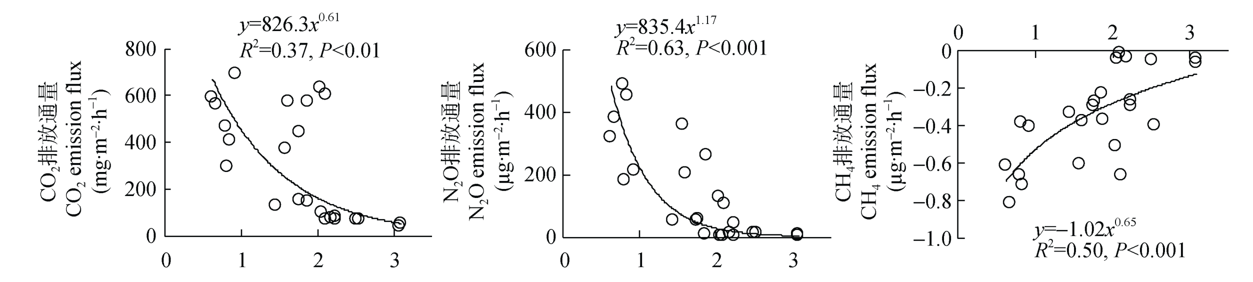
Fig. 3 Dynamic changes of catalase (A, B) and urease (C, D) activities after seeding of maize under different straw returning and nitrogen application treatments

2.4 土壤酶活性与温室气体排放通量的关系

图 4 表明，玉米田温室气体排放通量与土壤酶活性之间呈极显著相关关系(r=0.61~0.95**)。土壤 CO_2、N_2O 排放通量均随过氧化氢酶活性呈指数式逐渐降低，而 CH_4 排放通量则逐渐升高。土壤 CO_2、N_2O 排放通量均随土壤脲酶活性表现为先增后降的二次线性关系，而 CH_4 排放通量则呈先降后增的二次线性关系。

3 讨论

农业生产的目标是提升作物经济产量和农业的可持续发展，在农田生态系统中兼顾经济和环境双赢[8]，采取合理的农艺管理措施，能够以较小的环境代价获得更高的产出[16]。本研究表明，合理施肥



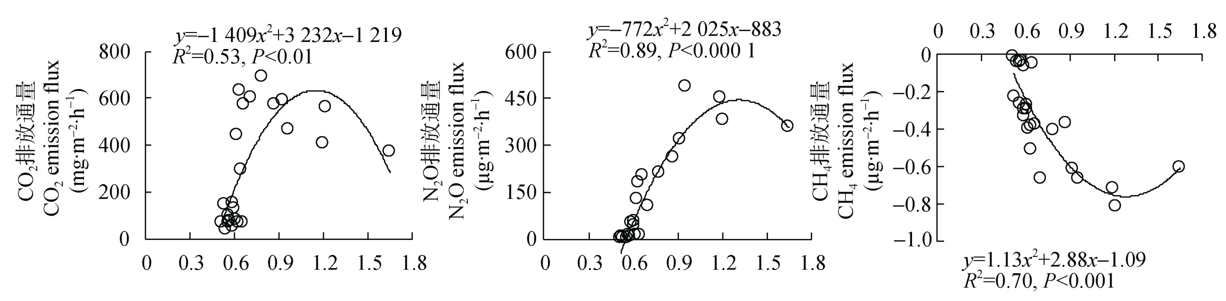


图 4 玉米田土壤酶活性与温室气体排放通量的关系

Fig. 4 Relationship between soil enzymes activities and greenhouse gas fluxes of maize field

和秸秆还田均能显著提高玉米产量，以秸秆还田后中等用量氮处理产量最高，与无秸秆还田最高氮用量处理无显著差异，说明秸秆连续还田 3 年以上，可替代部分氮肥并获得同样高的玉米产量。秸秆还田后，由于微生物腐解作用需要消耗土壤氮，为了解决与作物“争氮”问题需要补施氮肥。本研究表明最适施氮量为 240 kg·hm^{-2}，获得的玉米籽粒产量最高。同时，本研究还发现，无秸秆还田时，随施氮量增加，综合温室效应和土壤温室气体排放强度显著增加；而增施氮肥配合秸秆还田处理综合温室效应和土壤温室气体排放强度并未显著提高。因此，秸秆还田加适量氮，能显著降低综合温室效应和土壤温室气体排放强度，否则均会增加玉米生产的环境代价。

东北黑土区春玉米田，秸秆还田处理主要增加了土壤 CO_2 的排放量，秸秆还田配合增施氮肥土壤作为 CH_4“弱”碳汇的功能增强；当无秸秆还田时，随施氮量增加，CO_2 和 N_2O 排放量均显著提高。已有研究表明，施肥和秸秆还田均能够促进 CO_2 排放[21–22,31]，本研究结果也支持这一结论，这可能是秸秆还田配合施氮，缓解了土壤微生物与作物对氮素的争夺，适宜的土壤氮水平促进了土壤微生物活性，增强了根系生长活力和呼吸作用，总体表现出 CO_2 排放量增加。虽然，前人研究对于增施氮肥是否促进 N_2O 排放仍存在争议[13,32]，但主流观点认为施氮增加了 N_2O 排放[6,12,22]，本研究结果支持施氮促进 N_2O 排放[33]，这可能是因为外源输入的氮经土壤微生物硝化和反硝化作用直接生成了 N_2O[34]。因此，有效控制黑土区春玉米生产中氮肥投入，能够减少土壤 N_2O 排放。本研究对土壤过氧化氢酶和脲酶活性变化特征的描述佐证了上述观点，土壤酶活性与温室气体排放通量的关系进一步表明，增施氮肥降低了过氧化氢酶活性但提高了土壤脲酶活性，且秸秆还田使得土壤过氧化氢酶活性增强幅度加大而土壤脲酶活性降低幅度变小。对 3 种温室气体排放通量与 2 种土壤酶活性的回归分析表明，温室气体排放通量与氧化氢酶活性呈指数关系变化，CO_2、N_2O 逐渐降低而 CH_4 则逐渐升高；与土壤脲酶活性呈二次线性关系，CO_2 和 N_2O 呈先增后降，而 CH_4 则呈先降后增的变化趋势。农田生态系统 CO_2 的产生 85%来自土壤微生物活动，15%来自作物根系的呼吸作用[19]，显然，较强的过氧化氢酶活性有利于清除活性氧代谢产生的“毒害”，玉米根系和微生物活性增强，CO_2 排放增加[25,35–37]。

本研究针对当前全球增温大背景，回答了秸秆粉碎还田与氮用量对春玉米籽粒产量、土壤温室气体(CO_2、N_2O 和 CH_4)排放以及土壤碳氮代谢关键酶(过氧化氢酶和脲酶活性)的影响，解析了秸秆粉碎还田与增施氮肥条件下，土壤温室气体排放通量与土壤酶活性之间的关系，为东北黑土区春玉米持续稳定增产和温室气体减排提供了借鉴，对改良农田土壤，提高农田碳汇，减少农业源温室气体排放具有重要参考价值。而在秸秆还田条件下，定量解析气候要素，如温度、降水等与温室气体排放的关系，量化表征秸秆还田对玉米根系形态建成、衰老等关键过程及其与产量形成的关系，将是下一步研究的重点。

4　结论

秸秆还田配合施氮能显著提高玉米产量，秸秆还田后中等施氮水平(240 kg·hm^{-2})产量最高；施氮促进了 CO_2 和 N_2O 的排放，秸秆还田增加了 CO_2 排放，但排放强度显著降低。秸秆还田配合增施氮肥，土壤 CH_4 的碳汇功能增强。增施氮肥降低了土壤过氧化氢酶活性但提高了土壤脲酶活性，秸秆还田使得土壤过氧化氢酶活性增强幅度加大而土壤脲酶活性降低幅度变小。本研究表明秸秆还田配合 240 kg·hm^{-2} 施氮量处理的环境成本最低，能够有效抑制单纯增施氮肥对综合温室效应和土壤温室气体排放强度的促进作用。

参考文献　References

[1] 刘武仁，郑金玉，罗洋，等. 东北保护性耕作与“三改”耕作制研究进展[C]//2014 中国现代农业发展论坛论文集. 昆明: 中国农学会, 2015
Liu W R, Zheng J Y, Luo Y, et al. Conservative tillage and tillage research advance of “Three reforms” in Northeast China[C]//Chinese Modern Agricultural Development Forum Proceedings in 2014. Kunming: Chinese Association of Agricultural Science Societies, 2015
[2] 黄耀，孙文娟. 近 20 年来中国大陆农田表土有机碳含量的变化趋势[J]. 科学通报, 2006, 51(7): 750–763
Huang Y, Sun W J. Changes in topsoil organic carbon of croplands in mainland China over the last two decades[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(7): 750–763
[3] Kiehl J, Trenberth K E. Earth’s annual global mean energy budget[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1997, 78(2): 197
[4] Melillo J M, Steudler P A, Aber J D, et al. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system[J]. Science, 2002, 298(5601): 2173–2176
[5] 胡立峰，李洪文，高焕文. 保护性耕作对温室效应的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 308–312

Hu L F, Li H W, Gao H W. Influence of conservation tillage on greenhouse effect[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(5): 308–312

[6] 李燕青, 唐继伟, 车升国, 等. 长期施用有机肥与化肥氮对华北夏玉米 N_2O 和 CO_2 排放的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(21): 4381–4389
Li Y Q, Tang J W, Che S G, et al. Effect of organic and inorganic fertilizer on the emission of CO_2 and N_2O from the summer maize field in the North China Plain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(21): 4381–4389

[7] 郝小雨, 周宝库, 马星竹, 等. 氮肥管理措施对黑土玉米田温室气体排放的影响[J]. 中国环境科学, 2015, 35(11): 3227–3238
Hao X Y, Zhou B K, Ma X Z, et al. Effects of nitrogen fertilizer management on greenhouse gas emissions from maize field in black soil[J]. China Environmental Science, 2015, 35(11): 3227–3238

[8] 宋利娜, 张玉铭, 胡春胜, 等. 华北平原高产农区冬小麦农田土壤温室气体排放及其综合温室效应[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(3): 297–307
Song L N, Zhang Y M, Hu C S, et al. Comprehensive analysis of emissions and global warming effects of greenhouse gases in winter-wheat fields in the high-yield agro-region of North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(3): 297–307

[9] 王如芳, 张吉旺, 董树亭, 等. 我国玉米主产区秸秆资源利用现状及其效果[J]. 应用生态学报, 2011, 22(6): 1504–1510
Wang R F, Zhang J W, Dong S T, et al. Present situation of maize straw resource utilization and its effect in main maize production regions of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(6): 1504–1510

[10] 黄坚雄, 陈源泉, 刘武仁, 等. 不同保护性耕作模式对农田的温室气体净排放的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(14): 2935–2942
Huang J X, Chen Y Q, Liu W R, et al. Effect on net greenhouse gases emission under different conservation tillages in Jilin Province[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(14): 2935–2942

[11] 赵伟, 陈雅君, 王宏燕, 等. 不同秸秆还田方式对黑土土壤氮素和物理性状的影响[J]. 玉米科学, 2012, 20(6): 98–102
Zhao W, Chen Y J, Wang H Y, et al. Impact of different straw return systems on nitrogen and physical characters in black soil[J]. Journal of Maize Sciences, 2012, 20(6): 98–102

[12] 李虎, 邱建军, 王立刚, 等. 中国农田主要温室气体排放特征与控制技术[J]. 生态环境学报, 2012, 21(1): 159–165
Li H, Qiu J J, Wang L G, et al. The characterization of greenhouse gases fluxes from croplands of China and mitigation technologies[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(1): 159–165

[13] Zou J W, Huang Y, Zong L G, et al. Carbon dioxide, methane, and nitrous oxide emissions from a rice-wheat rotation as affected by crop residue incorporation and temperature[J]. Advanced in Atmospheric Sciences, 2004, 21(5): 691–698

[14] Hou P, Gao Q, Xie R Z, et al. Grain yields in relation to N requirement: Optimizing nitrogen management for spring maize grown in China[J]. Field Crops Research, 2012, 129: 1–6

[15] 高强, 冯国忠, 王志刚. 东北地区春玉米施肥现状调查[J]. 中国农学通报, 2010, 26(14): 229–231
Gao Q, Feng G Z, Wang Z G. Present situation of fertilizer application on spring maize in northeast China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(14): 229–231

[16] Chen X P, Cui Z L, Fan M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. Nature, 2014, 514(7523): 486–489

[17] 刘建新. 不同农田土壤酶活性与土壤养分相关关系研究[J]. 土壤通报, 2004, 35(4): 523–525
Liu J X. Correlative research on the activity of enzyme and soil nutrient in the different types of farmland[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2004, 35(4): 523–525

[18] 周礼恺, 张志明, 曹承绵. 土壤酶活性的总体在评价土壤肥力水平中的作用[J]. 土壤学报, 1983, 20(4): 413–418
Zhou L K, Zhang Z M, Cao C M. On the role of the totality of soil enzyme activities in the evaluation of the level of soil fertility[J]. Acta Pedologica Sinica, 1983, 20(4): 413–418

[19] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest[J]. Global Change Biology, 1998, 4(2): 217–227

[20] 崔新卫, 张杨珠, 吴金水, 等. 秸秆还田对土壤质量与作物生长的影响研究进展[J]. 土壤通报, 2014, 45(6): 1527–1532
Cui X W, Zhang Y Z, Wu J S, et al. Research progress on the effects of returning straw to fields on soil quality and crop growth[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(6): 1527–1532

[21] 贺京, 李涵茂, 方丽, 等. 秸秆还田对中国农田土壤温室气体排放的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(20): 246–250
He J, Li H M, Fang L, et al. Influence of straw application on agricultural greenhouse gas emissions in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(20): 246–250

[22] 罗龙皂, 李渝, 蒋太明. 秸秆还田固碳增汇效果研究进展[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(10): 2238–2241
Luo L Z, Li Y, Jiang T M. Research on the carbon-sink effect of straw returning[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2013, 52(10): 2238–2241

[23] Edmeades D C. The long-term effects of manures and fertilisers on soil productivity and quality: A review[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2003, 66(2): 165–180

[24] Chu H Y, Hosen Y, Yagi K. NO, N_2O, CH_4 and CO_2 fluxes in winter barley field of Japanese Andisol as affected by N fertilizer management[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(1): 330–339

[25] 张俊丽, 高明博, 温晓霞, 等. 不同施氮措施对旱作玉米地土壤酶活性及 CO_2 排放量的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(19): 6147–6154
Zhang J L, Gao M B, Wen X X, et al. Effects of different fertilizers on soil enzyme activities and CO_2 emission in dry-land of maize[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(19): 6147–6154

[26] 沈仕洲, 王风, 薛长亮, 等. 施用有机肥对农田温室气体排

放影响研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2015(6): 1–8
Shen S Z, Wang F, Xue C L, et al. Research advances on effect of organic fertilizer on farmland greenhouse gas emissions[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2015(6): 1–8

[27] 董玉红, 欧阳竹, 李鹏, 等. 长期定位施肥对农田土壤温室气体排放的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(1): 97–100
Dong Y H, Ouyang Z, Li P, et al. Influence of long-term fertilization on greenhouse gas fluxes from agricultural soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(1): 97–100

[28] 张明园, 魏燕华, 孔凡磊, 等. 耕作方式对华北农田土壤有机碳储量及温室气体排放的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 203–209
Zhang M Y, Wei Y H, Kong F L, et al. Effects of tillage practices on soil carbon storage and greenhouse gas emission of farmland in North China[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6): 203–209

[29] Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, et al. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing[C]//Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press, USA, 2007

[30] 关松荫. 土壤酶活性影响因子的研究: Ⅰ. 有机肥料对土壤中酶活性及氮磷转化的影响[J]. 土壤学报, 1989, 26(1): 72–78
Guan S Y. Studies on the factors influencing soil enzyme activities: Ⅰ. Effects of organic manures on soil enzyme activities and N, P transfomations[J]. Acta Pedologica Sinica, 1989, 26(1): 72–78

[31] 翟洋洋, 程云湘, 常生华, 等. 干旱地区农田生态系统土壤温室气体排放机制[J]. 中国农学通报, 2015, 31(9): 231–236
Zhai Y Y, Cheng Y X, Chang S H, et al. Mechanism of greenhouse gas emission from agro-ecosystem soil in arid regions[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(9): 231–236

[32] Beare M H, Wilson P E, Fraser P M. Management effects on barley straw decomposition, nitrogen release, and crop production[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(3): 848–856

[33] 焦燕, 黄耀, 宗良纲, 等. 氮肥水平对不同土壤 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2094–2098
Jiao Y, Huang Y, Zong L G, et al. Impact of different levels of nitrogen fertilizer on N_2O emission from different soils[J]. Environmental Science, 2008, 29(8): 2094–2098

[34] 朱小红, 马友华, 杨书运, 等. 施肥对农田温室气体排放的影响研究[J]. 农业环境与发展, 2011, 28(5): 42–46
Zhu X H, Ma Y H, Yang S Y, et al. Study on effect of fertilization on greenhouse gas emission from farmland[J]. Agricultural Environment and Development, 2011, 28(5): 42–46

[35] 张志栋, 刘景辉, Yu Q, 等. 施肥对旱作免耕土壤酶活性与 CO_2 排放量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(5): 85–91
Zhang Z D, Liu J H, Yu Q, et al. Effects of different fertilizers on soil enzyme activities and soil CO_2 emission under no-tillage on dry land in farming-pastoral zone of northern China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(5): 85–91

[36] 沈宏, 曹志洪, 徐本生. 玉米生长期间土壤微生物量与土壤酶变化及其相关性研究[J]. 应用生态学报, 1999, 10(4): 471–474
Shen H, Cao Z H, Xu B S. Dynamics of soil microbial biomass and soil enzyme activity and their relationships during maize growth[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1999, 10(4): 471–474

[37] 路文涛, 贾志宽, 张鹏, 等. 秸秆还田对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3): 522–528
Lu W T, Jia Z K, Zhang P, et al. Effects of straw returning on soil labile organic carbon and enzyme activity in semi-arid areas of Southern Ningxia, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(3): 522–528